Revista ALCONPAT
www.revistaalconpat.org
eISSN 2007-6835
Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

Comparação do comportamento mecânico de lajes reforçadas com PRFV e aço

R. Christ[1,*], H. Z. Ehrenbring[2], F. Pacheco[2], D. Schneider[2], B. F. Tutikian[2], G. F. Moreira[2], L. Wegher[3], O. Beliaev[4]
* Autor de Contato: rchrist@unisinos.br
DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v14i3.759

Recebido: 01/06/2024 | Correções recebidas: 31/07/2024 | Aceito: 02/08/2024 | Publicado: 01/09/2024

RESUMO

O objetivo deste estudo é avaliar o comportamento mecânico do GRFP em lajes maciças de concreto. O uso de vergalhões de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) no projeto de construção tem sido uma técnica alternativa para fornecer estruturas mais duráveis. No entanto, existe a necessidade de avaliar o comportamento das lajes reforçadas com PRFV sob flexão e comparar o estado de serviço (SS) e o estado de serviço último (USS) do elemento carregado. Assim, lajes de concreto armado de espessuras variadas foram construídas com vergalhões de aço e PRFV. Os resultados mostram que a carga aplicada para a deflexão máxima do vão da laje de PRFV sob SS foi 50% menor do que para aquela com armadura de aço. A deflexão máxima do vão da laje de PRFV sob USS também foi 282% maior do que para armaduras de vergalhões de aço.
Palavras-chave: PRFV; estrutura de concreto; lajes; resistência à flexão; comportamento mecânico.

Citar como: Christ, R., Ehrenbring, H. Z., Pacheco, F., Schneider, D., Tutikian, B. F., Moreira, G. F., Wegher, L., Beliaev, O. (2024), "*Comparação do comportamento mecânico de lajes reforçadas com PRFV e aço*", Revista ALCONPAT, 14 (3), pp. 224 – 240, DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v14i3.759

[1] Department of Civil and Environmental, Universidad de la Costa, Calle 58 #55-66, Barranquilla 080002, Colombia.
[2] Polytechnical School, UNISINOS University, São Leopoldo, 93040-230, Brazil.
[3] Civil engineering and is the CEO for te Composit Group Brasil, Chapecó, 89801-000, Brazil.
[4] State Institute of Commerce, Смольная, 125195, Moscow.

Contribuição de cada autor
Conceituação, Roberto Christ, Hinoel Z. Ehrenbring e Fernanda Pacheco; metodologia, Roberto Christ, Hinoel Z. Ehrenbring, Fernanda Pacheco e Gian de Fraga Moreira; validação, Bernardo F. Tutikian; investigação, Diego Schneider; administração do projeto, Leandro Wegher e Oleg Beliaev.

Licença Creative Commons
Copyright (2024) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 (CC BY 4.0).

Discussões e correções pós-publicação
Qualquer disputa, incluindo as respostas dos autores, será publicada na segunda edição de 2025, desde que as informações sejam recebidas antes do fechamento da primeira edição de 2025.

© 2024 ALCONPAT Internacional

Comparison of mechanical behavior of slabs reinforced with GFRP and steel

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the mechanical behavior of GRFP in massive concrete slabs. The use of glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebars in construction design has been an alternative technique to provide more durable structures. However, there is a need to evaluate the behavior of GFRP reinforced slabs under flexure and to compare the service state (SS) and ultimate service state (USS) of the loaded element. Thus, reinforced concrete slabs of varying thicknesses were constructed with steel and GFRP rebars. Results show that the applied load for maximum span deflection of the GFRP slab under SS was 50% lower than for the one with steel reinforcement. The maximum span deflection of the GFRP slab under USS was also 282% larger than for steel rebars reinforcement.

Keywords: GFRP; reinforced concrete; slabs; flexural tensile; mechanical behavior.

Comparación del comportamiento mecánico de losas reforzadas con PRFV y acero

RESUMEN

El objetivo de este estudio es evaluar el comportamiento mecánico del PRFV en losas de hormigón macizo. El uso de barras de refuerzo de polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) en el diseño de la construcción ha sido una técnica alternativa para proporcionar estructuras más duraderas. Sin embargo, es necesario evaluar el comportamiento de las losas reforzadas con PRFV bajo flexión y comparar el estado de servicio (SS) y el estado de servicio final (USS) del elemento cargado. Así, se construyeron losas de hormigón armado de diferentes espesores con acero y barras de refuerzo de PRFV. Los resultados muestran que la carga aplicada para la deflexión máxima del vano de la losa de PRFV bajo SS fue un 50% menor que para la de la placa con armadura de acero. La deflexión máxima del tramo de la losa de PRFV bajo USS también fue un 282% mayor que la del refuerzo de barras de refuerzo de acero.

Palabras clave: PRFV; estructura de hormigón; losas; fuerza flexible; comportamiento mecánico.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de polímeros reforçados com fibras (PRF) em estruturas, tanto em concreto armado quanto em elementos estruturais com perfil variado, vem aumentando (Satasivam et al., 2018). Como resultado, estudos para avaliar as vantagens do concreto reforçado com PRF foram conduzidos em vários países. Esses estudos avaliaram as propriedades mecânicas do PRF e seu efeito potencial no desempenho quando incorporado em um elemento estrutural (Ahmed et al., 2020; Gajdošová et al., 2020; Gravina et al., 2020; Zhang et al., 2021; Бондалетова, 2013). Normas específicas para barras de FRP e estruturas reforçadas foram desenvolvidas no mundo, como ACI 440.1R-15 (2015), CAN/CSA S806-12 (2012), CNR-DT 206 (2006), GOST 31938 (2014), GOST 30247.0 (1994) and GOST 32486 (2013).

A corrosão é o mecanismo de degradação mais relevante em estruturas de concreto armado e de maior impacto, seja pelo contato com dióxido de carbono ou íons cloreto (Gajdošová et al., 2020). Os reforços de aço sob corrosão degradam-se, diminuindo a estabilidade estrutural de toda edificação (Jabbar; Farid, 2018). Este fenômeno por si só demonstra a importância do reforço de PRF, pois ele não corrói e prolonga a vida útil no estado de límite de serviço (ELS) da estrutura. Estudos já comprovaram que o PRF é resistente a ambientes alcalinos, como matrizes cimentícias (Gravina et al., 2020; Manalo et al., 2020).

Por outro lado, como o PRFV é um compósito formado por fibras e resina, deve-se utilizar uma combinação específica de materiais dependendo de sua aplicação para garantir certas características de durabilidade do elemento (Bakouregui et al., 2021). Em PRF para produzir Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (GFRP). No entanto, o tipo de fibra de vidro usado também deve ser resistente a álcalis (Arczewska; Polak; Penlidis, 2021).

As lajes de concreto armado são elementos estruturais importantes que absorvem e distribuem as cargas de uma edificação e estão sujeitas principalmente à flexão (Mahroug; Ashour; Lam, 2014). Vários estudos examinaram o efeito de diferentes tipos de PRF no comportamento de lajes e vigas (Ahmed et al., 2020; Ashour, 2006; Barris et al., 2013; Mahroug; Ashour; Lam, 2014; Noël; Soudki, 2014; Satasivam et al., 2018). No entanto, Kaszubska et al. (Kaszubska; Kotynia; Barros, 2017) observou que um obstáculo no uso do PRF era que esse tipo de vergalhão de reforço tinha comportamento elástico-linear e baixo módulo de elasticidade, o que o tornava propenso à ruptura frágil quando submetido a uma alta tensão de tração, levando à falha repentina.

Projetos de concreto reforçado com aço aproveitam o potencial de ambos os materiais, ou seja, a resistência à compressão do concreto e a resistência à tração do aço. Neste caso, a resistência do aço é totalmente utilizada quando o aço de reforço começa a ceder e contribui para a ductilidade da estrutura (Shi et al., 2020). No caso de projetos de concreto armado com PRF, o escoamento excessivo do elemento é indesejável, pois o PRF não cede, apresenta um comportamento elástico linear e a deformação do elemento é maior do que a do aço (Chu; Hossain; Lachemi, 2020).

A deformação das barras de reforço de PRFV afetou diretamente o desempenho estrutural e o ELS (Starkova et al., 2012). Houve três estágios de deformação do FRP. No primeiro estágio, a deformação foi observada principalmente na resina devido ao seu baixo módulo de elasticidade e redistribuição de tensões nas fibras (Shi et al., 2015). O segundo estágio continha um aumento lento na deformação devido às características construtivas da barra de reforço, como espaços vazios na resina e na fibra. O terceiro estágio ocorreu quando a tensão da barra de reforço excedeu 60% de sua tensão máxima (Wang et al., 2014).

No caso do GFRP, a relação entre a deformação máxima e a deformação elástica inicial diminuiu quando a tensão aplicada excedeu 30% da sua resistência máxima à tração (Najafabadi et al., 2018). Ensaios mecânicos em lajes reforçadas com GFRP submetidas à flexão em temperaturas ambiente e elevadas foram conduzidos por Gao et al. (Gao et al., 2020) e Rosa et al. (Rosa et al., 2020). No entanto, esses estudos se concentraram na capacidade de carga e na deformação final dos elementos.

O objetivo deste estudo, portanto, é aumentar o conhecimento sobre o comportamento mecânico de lajes reforçadas com GFRP de diferentes espessuras sob flexão. Estudos experimentais e analíticos foram conduzidos para avaliar o ELU e ELS de lajes reforçadas com GFRP em comparação com aço. Um estudo detalhado sobre a ocorrência de cargas de primeira fissura para diferentes espessuras de laje foi realizado e sua relação com os momentos máximos foi analisada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram produzidas doze lajes com 3.000 mm de comprimento e 1.100 mm de largura. As espessuras (w) selecionadas foram 70 mm, 100 mm e 120 mm. O reforço foi fornecido com barras de PRFV de 8 mm de diâmetro e foram feitas três montagens de lajes de teste para cada espessura de laje. Para fins de comparação, foram fabricadas 3 lajes de 100 mm de espessura com barras de aço do mesmo diâmetro. Os corpos de prova foram identificados como GFRP-70 (w = 70 mm), GFRP-100 (w = 100 mm), GFRP-120 (w = 120 mm) e Aço-100 (w = 100 mm). As lajes com seções transversais mostradas na Figura 1. A classe de resistência do concreto foi de 40 MPa, conforme recomendado na norma C143-20 (ASTM, 2020).

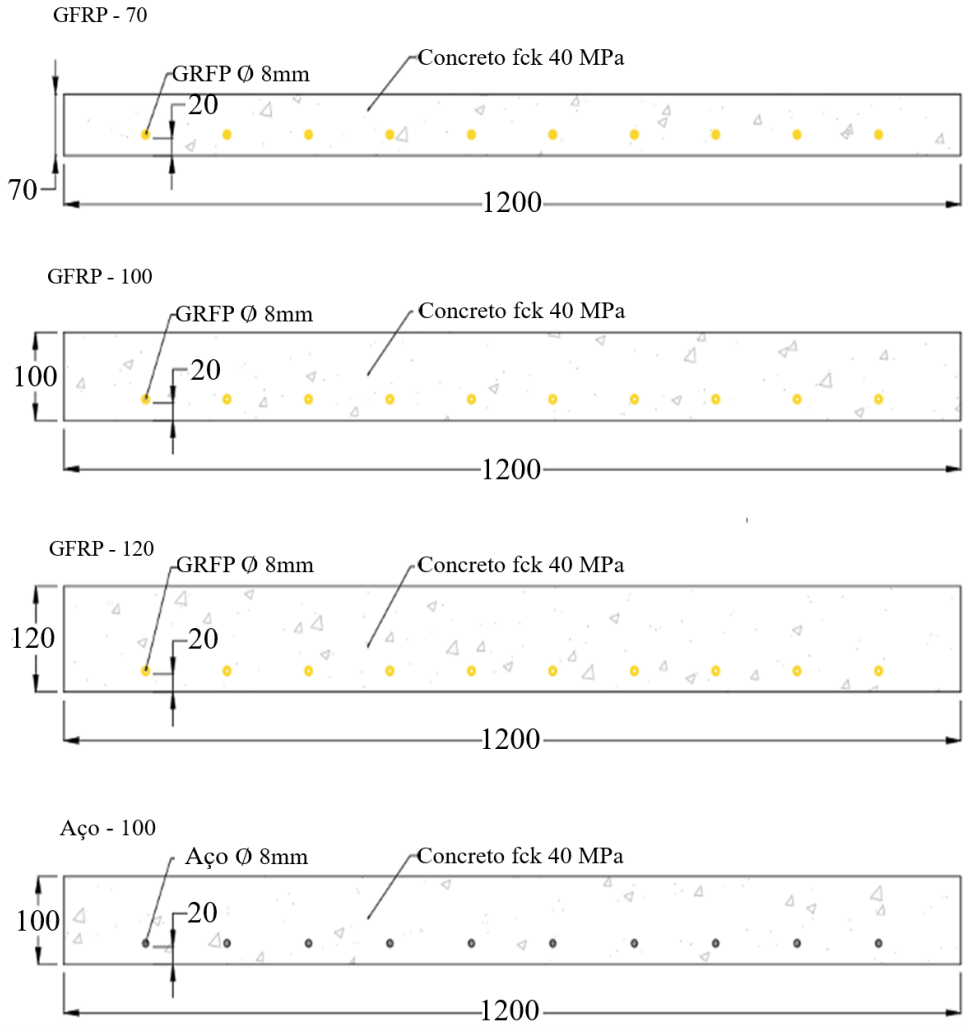


Figura 1. Seção transversal da amostra das lajes deste estudo (dimensões em mm).

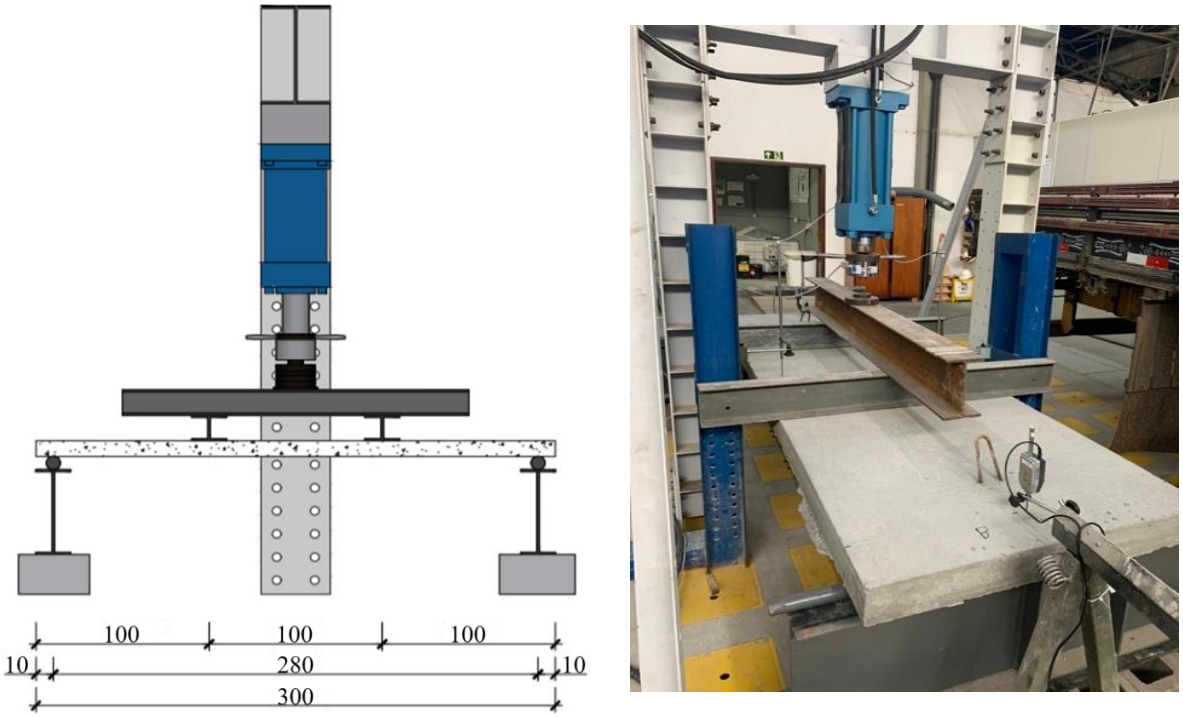
Tanto as barras de GFRP quanto as de aço tinham diâmetros nominais de 8 mm e área de seção transversal de 40,5 mm2. As barras de GFRP foram fabricadas em um processo de pultrusão com fibras de fibra de vidro tipo E impregnadas com resina epóxi. A superfície externa das barras de

GFRP tinha ranhuras correspondentes ao tipo de fibra e resina usadas na fabricação. As barras de aço eram de aço carbono A615/A615M-14. As propriedades mecânicas das barras de GFRP usadas neste estudo são mostradas na Tabela 1. As barras de GFRP foram avaliadas seguindo a norma ASTM D7205 e as barras de aço seguindo as prescrições ASTM A615.

Tabela 1. Propriedades mecânicas de barras de GFRP e aço deste estudo

Propriedades	Aço	GFRP
Resistencia à compressão (MPa)	500	300
Resistencia à tração (MPa)	500	1,000
Resistencia ao cisalhamento (MPa)	500	150
Módulo de elasticidade (GPa)	210	50

As lajes foram submetidas a ensaios de flexão estática de 4 pontos, conforme mostrado na Figura 2. A capacidade de carga do aparelho foi de 300 kN monitorada por uma célula de carga de 50 kN com resolução de 0,01 kN. A deflexão da laje foi medida com dois transdutores de deslocamento variável linear (LVDT) com resolução de 0,002 mm colocados nas extremidades do meio do vão. Os dados de carga e deflexão foram registrados com uma taxa de 10 Hz. A metodologia de teste foi o deslocamento prescrito a uma taxa de 5 mm/min.
Cargas máximas experimentais foram analisadas e comparadas com momentos nominais calculados analiticamente de acordo com a norma ACI 440.1R-15 (ACI 440.1R-15, 2015). As lajes de GFRP foram avaliadas para dois modos de falha: (a) falha governada por esmagamento do concreto e (b) falha governada por ruptura do FRP, conforme mostrado na Figura 3.



(a) (b)

Figura 2. Dimensões do aparelho de teste de flexão em centímetros: (a) posicionamento e instrumentação do corpo de teste e (b) teste real em andamento.

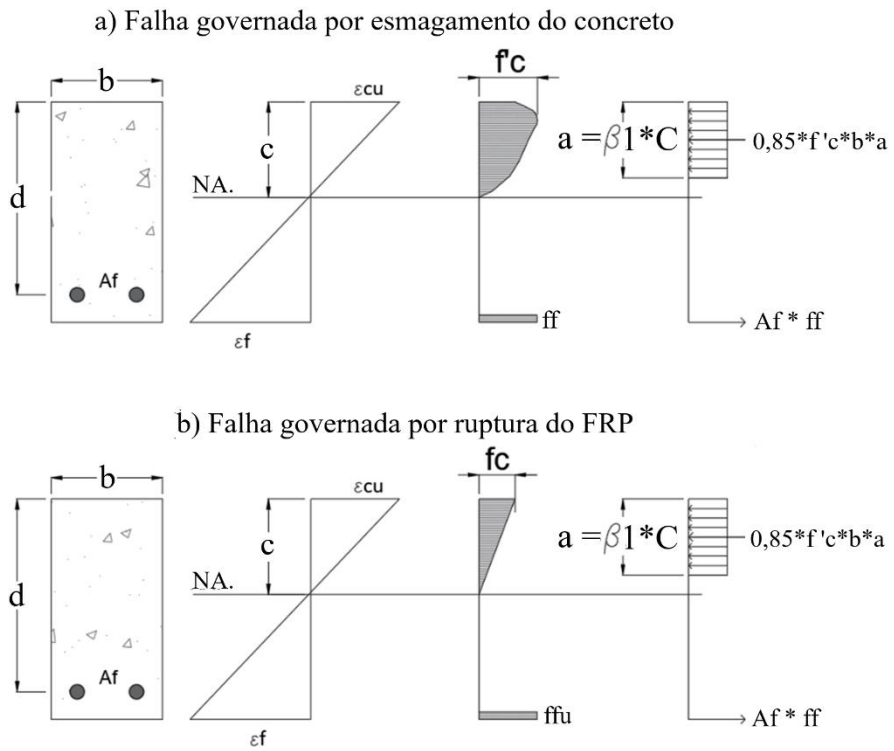


Figura 3. Condições de ruptura por flexão para concreto reforçado com FRP.
Fonte: ACI 440.1R-15 (2015).

O modo de ruptura flexural resultante dependia da relação entre a taxa de reforço e a taxa de reforço balanceada. A taxa de reforço (ρf), mostrada na Eq. 1, é a razão entre a área efetiva da seção transversal do reforço em relação à área efetiva da seção transversal do concreto. A taxa de reforço balanceada (ρfb), mostrada na Eq. 2, é a razão de reforço na qual ocorre a transição do modo de falha. Se ρf fosse menor ou igual a ρfb (ρf ≤ ρfb), a ruptura era controlada pelo estresse na barra de reforço de FRP. Se ρf fosse 1,4 vezes maior ou igual a ρfb (ρf ≥ 1,4 ρfb), a ruptura ocorria por esmagamento do concreto. Mas se ρf fosse menor que ρfb e menor que 1,4 ρfb (ρf < ρfb < 1,4 ρfb), a ruptura ocorria tanto pelo esmagamento do concreto quanto pelo estresse do FRP.

$$\rho_f = \frac{A_f}{b\ x\ d} \qquad \text{Eq. 1}$$

$$\rho_{fb} = 0{,}85\ x\ \beta_1 x\ \frac{f'_c}{f_{fc}}\ x\ \frac{E_f\ x\ \varepsilon_{cu}}{E_f\ x\ \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \qquad \text{Eq. 2}$$

A partir da análise do modo de ruptura em relação à taxa de armadura, a resistência nominal ao momento das lajes (M_n) pode ser determinada. No caso de ruptura por esmagamento do concreto, o momento é dado pela Eq. 3. No caso de ruptura da barra de reforço de FRP, o momento é dado pela Eq. 4. O momento nominal de qualquer modo de falha deve ser multiplicado por um coeficiente de redução (Ø) dado pela Eq. 5. Os cálculos foram feitos de acordo com o ACI 440.1R-15 (ACI 440.1R-15, 2015) e comparados com os momentos máximos e momentos limites de deformação dos dados experimentais. A partir desses resultados, os coeficientes de segurança de cada um dos elementos de laje estrutural testados foram avaliados.

$$M_n = A_f \; x \; f_f \; x \left(d - \frac{\frac{A_f \; x \; f_f}{0{,}85 \; x \; f'_c \; x \; b}}{2} \right) \qquad \text{Eq.3}$$

$$M_n = A_f \; x \; f_{fu} \; x \left(d - \frac{\left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) x \; d}{2} \right) \qquad \text{Eq.4}$$

$$\emptyset = \left\{ 0{,}55 \; for \; \rho_f \leq \rho_{fb} \; 0{,}3 + 0{,}25 \; x \; \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \; for \; \rho_{fb} < \rho_f < 1{,}4\rho_f \; 0{,}65 \; for \; \rho_f \geq 1{,}4\rho_{fb} \right\} \qquad \text{Eq.5}$$

3. RESULTADO

3.1. Comportamento experimental de flexão de GFRP

Os resultados dos ensaios de flexão de 4 pontos nas lajes GRFP são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios e desvio padrão das propriedades medidas em lajes reforçadas com GFRP.

Propriedades	Lajes		
	GRFP-70 (70 mm)	GRFP-100 (100 mm)	GRFP-120 (120 mm)
f_1 (kN)	0.2 ± 0.01	6.5 ± 0.99	12.6 ± 0.80
$\boldsymbol{\delta}_1$ (mm)	0.2 ± 0.05	3.8 ± 0.54	7.1 ± 0.86
$F_{\boldsymbol{\delta}ELS}$ (kN)	0.3 ± 0.03	7.5 ± 0.54	13.3 ± 0.60
f_u (kN)	5.8 ± 0.27	42.8 ± 2.20	45.7 ± 0.11
$\boldsymbol{\delta}_{ELS}$ (mm)	255 ± 180	209 ± 139	116 ± 040
M_{cr} (kN.m)	0.2 ± 0.01	6.4 ± 0.97	12.3 ± 0.78
M_{max} (kN.m)	5.7 ± 0.27	42.0 ± 2.16	44.8 ± 0.11
$M_{LD,initial}/M_{cr}$	0.9 ± 0.00	0.5 ± 0.00	0.2 ± 0.00
$M_{LD,final}/M_{max}$	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00

f_1 – carga máxima na primeira fissura; $\boldsymbol{\delta}_1$ – deflexão na primeira fissura; $f_{\boldsymbol{\delta}ELS}$: – carga máxima para ELS; f_u – carga máxima; $\boldsymbol{\delta}_{ELS}$ – deflexão máxima para ELS; M_{cr} – momento na primeira fissura; M_{max} – momento máximo, $M_{LD,initial}$ – momento na diminuição da carga inicial, $M_{LD,final}$ – momento na diminuição da carga final

A Tabela 2 mostra que f_1 para todas as lajes foi menor do que a carga de deslocamento de L/250 para 11,2 mm, considerando o tamanho do espécime. Os valores de f_1 e $f_{\boldsymbol{\delta}ELS}$ também aumentaram conforme a espessura da laje aumentou, mas em uma taxa baixa. No entanto, a formação da primeira fissura foi retardada e o ganho em rigidez foi basicamente devido à espessura da laje.

A razão f_1 / $f_{\boldsymbol{\delta}ELS}$ se aproximou de 1,0 conforme a espessura da laje aumentou: 0,66 para GFRP-70, 0,87 para GFRP-100 e 0,95 para GFRP-120. A diminuição da rigidez de um elemento foi associada à ocorrência prematura da primeira fissura, conforme observado por Jabbad e Farid (Jabbar; Farid, 2018).

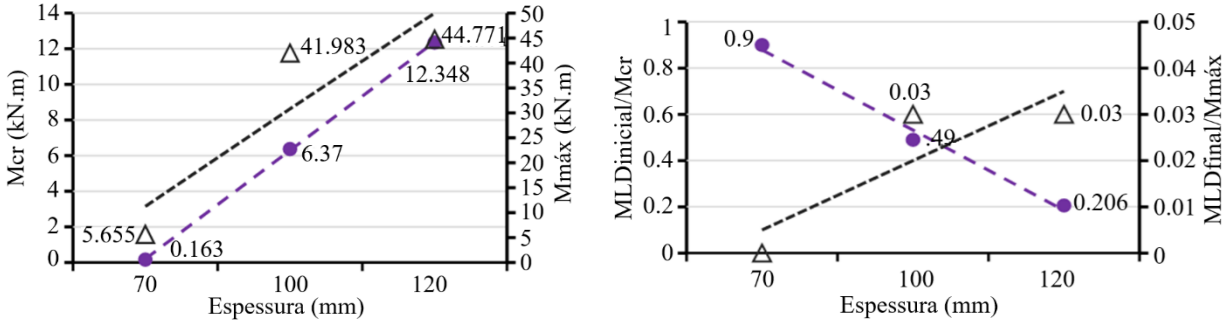
Consequentemente, lajes mais finas com menos concreto presente dependiam da taxa de armadura para resistir às fissuras do concreto (Ebead; Marzouk, 2004). Assim, no caso da laje de GFRP de 70 mm, aumentos na taxa de armadura trariam mais relevância aumentando o M_{cr} do que aumentando a espessura da laje.

Aumentos na espessura da laje limitaram a deformabilidade, o que era esperado de estudos de referência (PELED; BENTUR; YANKELEVSKY, 1998). As lajes GRFP-120 tiveram a menor deflexão, de até 116 mm, que foi menos da metade da deflexão máxima do vão medida para GRFP-70. Os momentos M_{cr} e M_{max} também aumentaram com o aumento da espessura da laje, com um aumento de 70% na espessura resultando em um aumento de 7 vezes em M_{max}. À medida que a carga diminuiu em relação ao aumento da deflexão da linha central (verificado em uma curva de deflexão), os momentos instantâneos na diminuição da carga (M_{LD}) foram determinados. No caso das lajes GRFP, a maior deformabilidade foi uma consequência do módulo de elasticidade de 50 GPa do reforço, o que tornou o M_{LD} mais importante no primeiro 1/3 da curva de carga devido à fissuração.

Também foi perceptível na Tabela 2 que a razão $M_{LD,initial}/M_{cr\ diminuiu}$ conforme a espessura da laje aumentou. O valor de M_{LD} foi substancial para lajes GFRP-70, representando quase 90% da carga para a primeira fissura ocorrer. Essa razão diminuiu para 50% para GFRP-100 e 20% para GFRP-120. Mesmo para lajes mais espessas, essa diminuição de carga resultante da formação ou propagação de fissuras seria de interesse, conforme observado por Zheng, Yu (ZHENG; YU; PAN, 2012).

Lajes mais espessas tiveram mais controle sobre fissuras, pois os reforços estavam mais próximos das bordas sendo tensionadas. No caso da laje GRFP-70 mais fina, a cobertura de concreto era de 20 mm, os reforços estavam mais próximos do centro de gravidade do elemento do que da borda e a laje mais fina também tinha um braço de momento menor. Essas características resultaram em um atraso na redistribuição das cargas e quedas mais significativas no estresse.

A Figura 4 mostra os pontos de dados e ajustes de curva do momento de fissuração (M_{cr}), momento máximo (M_{max}) e momentos nas diminuições de carga inicial e final ($M_{LD,\ inicial}/M_{cr}$ e $M_{LD,\ final}/M_{max}$) em relação à espessura da laje para todas as lajes GRFP.

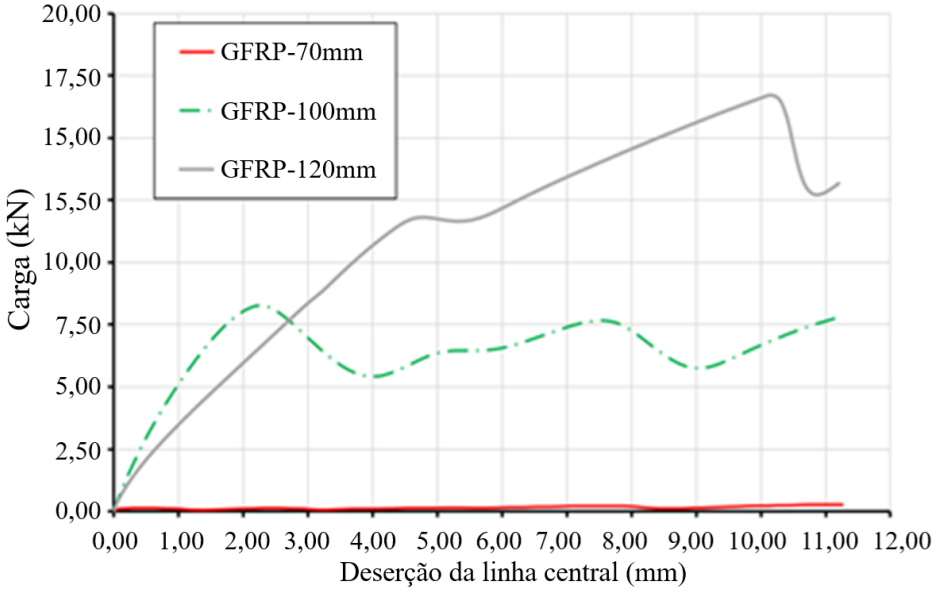


(a) (b)

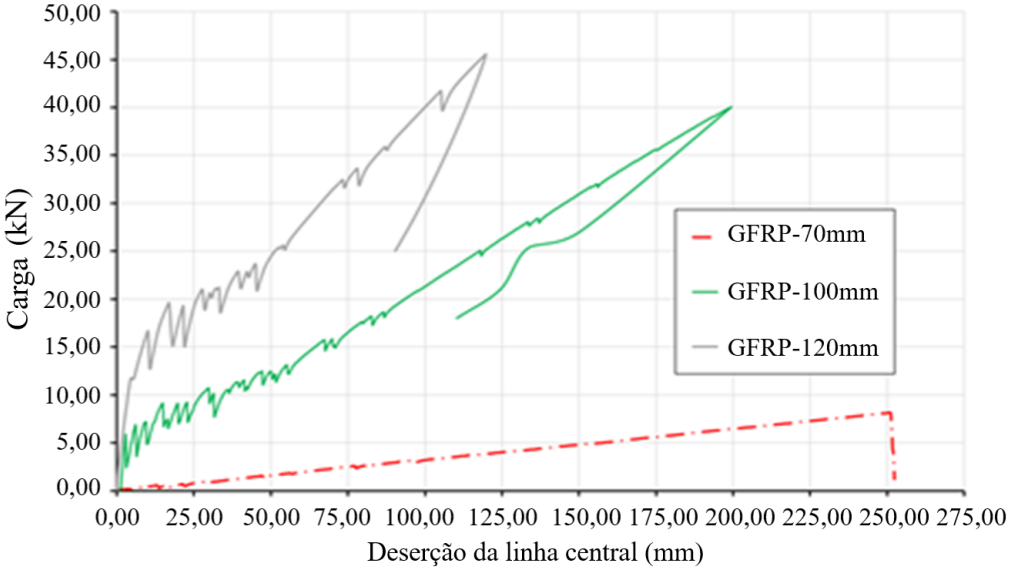
Figura 4. (a) Fissuração e momentos máximos e (b) relações M_{LD} em relação à espessura das lajes reforçadas com GRFP deste estudo.

A Figura 4(a) mostra que M_{cr} aumentou conforme a espessura da laje aumentou, e os valores foram correlacionados, pois o ajuste da curva teve R2 = 1. O mesmo resultado analítico foi observado para M_{max}. Quanto às razões da Fig. 4(b), $M_{LD,initial}/M_{cr}$ diminuiu conforme a espessura da laje aumentou. Esse comportamento foi atribuído ao aumento da rigidez do elemento, que estava diretamente relacionado à mudança na inércia conforme a espessura aumentou. O $M_{LD,initial}$ permaneceu proporcional entre as lajes como resultado de todas as lajes serem produzidas com o mesmo tipo de concreto com uma resistência à tração de aproximadamente 3,2 MPa. Por outro lado, $M_{LD,final}/M_{max}$ permaneceu essencialmente em zero para todas as lajes. Isso foi representativo da ausência ou queda insignificante nas cargas no último 1/3 das curvas de deflexão da Figura 5. A Figura 5 também mostra que, nos estágios inicial e final do teste, houve formação e propagação de várias fissuras, respectivamente, conforme observado por (Ahmed et al., 2020). Isso foi resultado do alongamento do reforço através da fissura e foi um comportamento esperado também

observado nos estudos de (BARRIS et al., 2013; ERFAN et al., 2021).



a) ELS



b) ELU

Figure 5. Curvas de deflexão para lajes reforçadas com GFRP deste estudo, a) estágio limite de serviço; b) estágio limite último.

A Figura 5(a) mostra as cargas ELS e suas flutuações até uma deflexão de 11,2 mm. As lajes GFRP-100 e GFRP 120 apresentaram redução na carga e altas deflexões, com comportamento semelhante, caracterizando o comportamento de fissuração múltipla. A laje GFRP 120 apresentou redução tanto na fissuração principal quanto na deflexão do vão.

Apenas as lajes identificadas como GFRP-70 mm não se comportaram de forma semelhante, devido à propagação de uma única fissura. As cargas ELS apresentaram vários picos indicativos de fissuras iniciais antes que o limite de deflexão na análise fosse atingido. Isso foi resultado da relação entre a carga de fissuração e o limite de deflexão ELS. À medida que a espessura da laje aumentava, as curvas se tornavam mais semelhantes, mas o número de quedas na carga diminuía. Isso estava de acordo com a hipótese de aumento da rigidez do elemento e nucleação tardia de fissuras em espessuras maiores (Jabbar; Farid, 2018).

Os resultados do ELU da Fig. 5(b) mostram estágios iniciais e finais distintos para todas as lajes. No caso de GFRP-100 e GFRP-120, a ocorrência de quedas na carga e no número de picos amorteceu quando a carga atingiu 50% do valor máximo. Esses comportamentos foram devidos às barras de GFRP terem módulo de elasticidade de valor semelhante ao tipo de concreto usado. Quedas na carga e aumento na deflexão foram indicativos da formação de novas fissuras sem atividade das barras de reforço, que atuaram como reforço passivo neste estágio. O reforço tornou-se ativo quando o concreto rachou e esticou as fibras através das aberturas. Isso exigiu que cargas mais altas fossem aplicadas para formar novas fissuras, pois tensões mais altas eram necessárias para abrir novas fissuras. Se o limite de carga para novas fissuras não fosse atingido, a propagação das fissuras mais antigas ocorria.

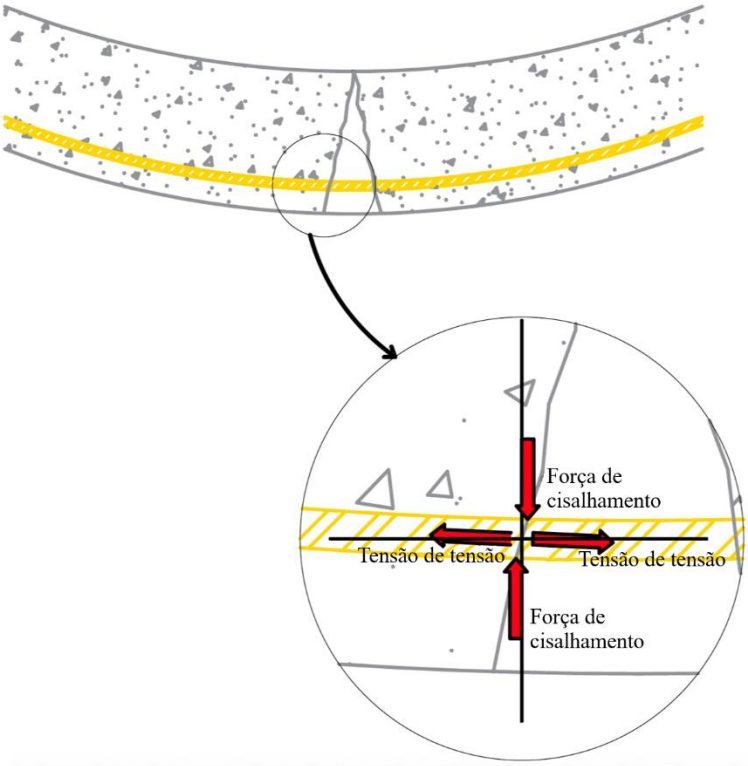


Figura 6. Distribuição de tensões na região de interface entre a barra de reforço GFRP e a fissura que levou à ruptura por cisalhamento

Deve-se notar que a ruptura ocorreu repentinamente nos elementos, apesar da alta flexibilidade. A Figura 6 mostra a distribuição de tensões na região de interface entre a barra de reforço GFRP e a fissura propagada. À medida que as fissuras se propagavam, as barras giravam em relação à fissura, induzindo tensões combinadas de tração e cisalhamento na região de interface. Isso ocorreu no segmento destacado da abertura e no final da fissura, onde a barra permaneceu ligada ao concreto e seguiu o mesmo ângulo de deformação do elemento. As deflexões medidas excederam os valores aceitáveis para elementos de concreto definidos pelas normas ACI 318, EN1992-1-1, ABNT NBR 6118 e outras. O desalinhamento entre as paredes da fissura induziu cisalhamento na barra de reforço GFRP. Isso foi perceptível na aparência visual da barra de reforço GFRP após a ruptura da laje mostrada na Figura 7. Assim, a ruptura repentina dos elementos foi resultado das tensões combinadas devido à tração e cisalhamento das barras de reforço.

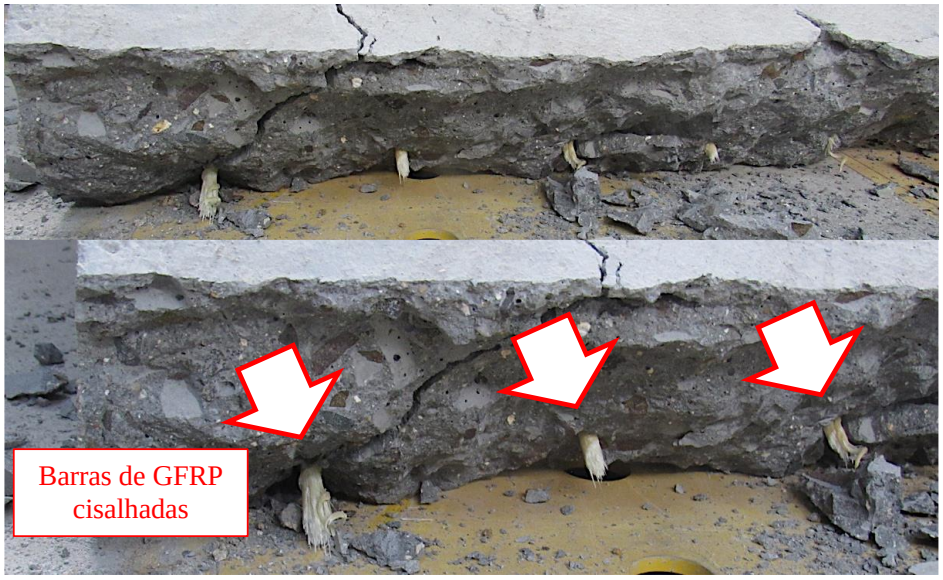


Figura 7. Aspecto visual da armadura de PRFV após ruptura por cisalhamento interno causado pela propagação de fissuras na laje

3.2. Comparação entre lajes reforçadas com aço e GFRP

A laje de 100 mm de espessura com reforço de aço foi comparada com GFRP-100 e os resultados mostrados na Tabela 3. Ambas as lajes tiveram desempenho semelhante, pois fissuraram antes que a carga aplicada atingisse $f_{\delta SS}$. No entanto, conforme mostrado na Tabela 3, os valores específicos de $f_{\delta SS}$ foram distintos para cada tipo de reforço. O aço teve um módulo de elasticidade maior que o GFRP e, por extensão, $f_{\delta SS}$ maior. Embora isso tenha apresentado comportamentos superiores e previsíveis, a carga máxima (fu) da laje de aço foi menor e a deflexão máxima (δ_{ELU}) foi 65% menor que o valor para GFRP-100.

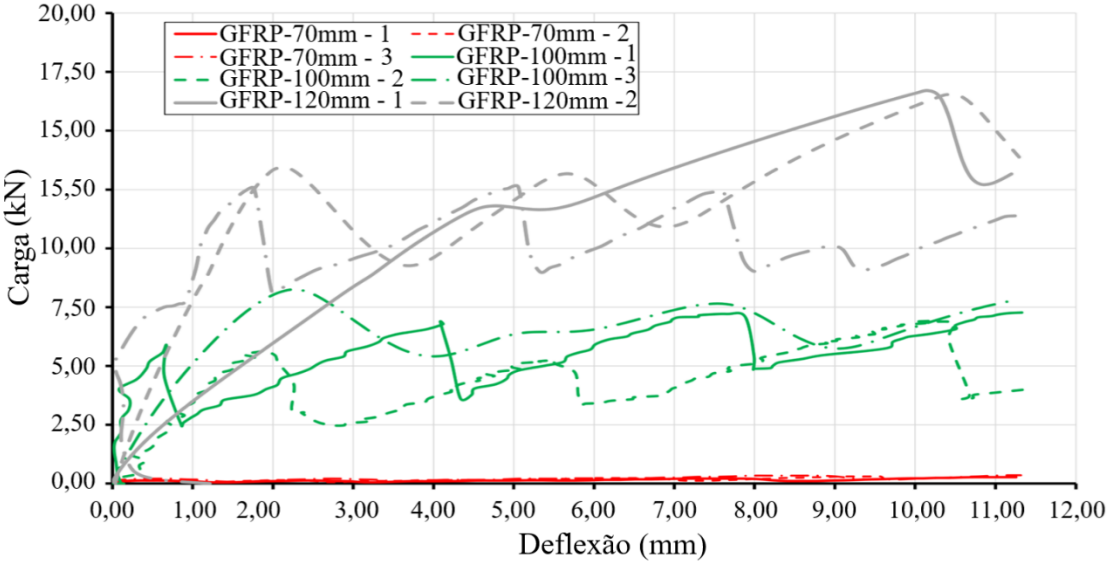
Tabela 3. Valores médios e desvio padrão das propriedades de lajes de 100 mm de espessura com armadura de aço ou PRFV

Propriedade	Laje com espessura h=100 mm	
	Aço	GFRP-100
f_1 (kN)	10.2 ± 1.02	6.5 ± 0.99
δ_1 (mm)	2.41 ± 0.04	3.8 ± 0.54
$F\delta_{ELS}$ (kN)	15.0 ± 0.60	7.5 ± 0.54
f_u (kN)	37.2 ± 0.43	42.8 ± 2.20
δ_{ELU} (mm)	7.4 ± 1.93	20.9 ± 1.39
M_{cr} (kN.m)	10.0 ± 1.00	6.4 ± 0.97
M_{max} (kN.m)	36.5 ± 0.42	42.0 ± 2.16
$M_{LD,initial}/M_{cr}$	0.0 ± 0.00	0.5 ± 0.00
$M_{LD,final}/M_{max}$	0.0 ± 0.00	0.0 ± 0.00

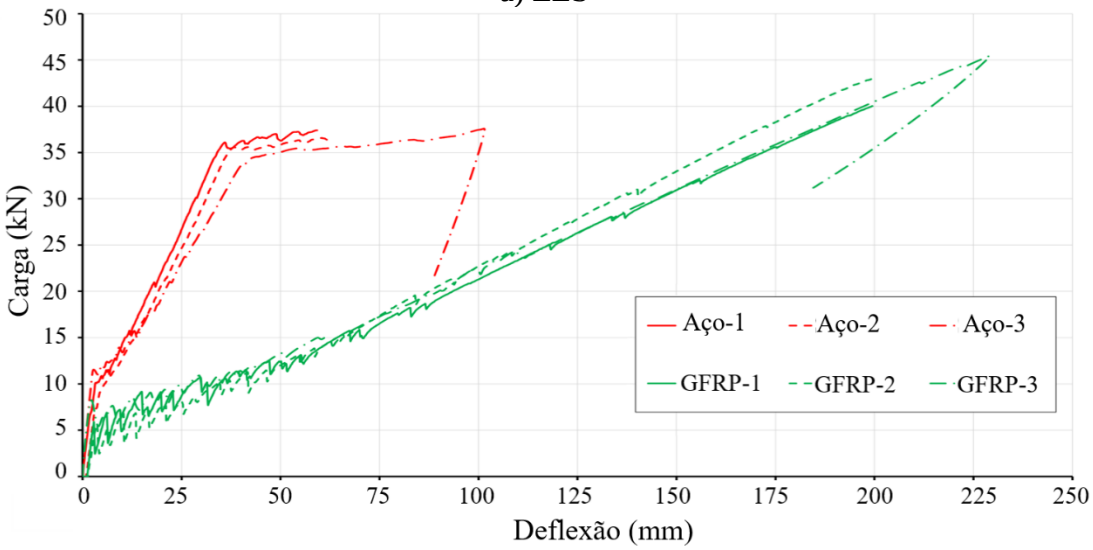
O módulo de elasticidade de cada tipo de reforço afetou a deformabilidade do elemento. O aço tem um módulo de elasticidade 3 a 4 vezes maior que o GFRP e, por extensão; elementos de aço devem ter deformações em torno de 3 vezes menores. No entanto, os resultados mostraram que a carga máxima (f_u) foi menor para a laje de aço devido ao GFRP ter maior resistência à tração do que o aço.

As comparações das curvas de deflexão entre as lajes reforçadas com aço e GFRP são mostradas na Figura 8 para ELS e ELS. Os resultados são mostrados para cada uma das 3 amostras de cada

tipo de laje. A queda nas cargas para ELS, quando avaliada como M_{LD} ao longo das curvas, mostrou que a laje de aço teve variações de M_{cr} em torno de 13 vezes menores e M_{max} em torno de 2 vezes menores que o GFRP-100. Este resultado também foi atribuído à diferença no módulo de elasticidade entre os materiais. Para a curva ELU, a laje de aço também apresentou um ganho de resistência para cima que, após estabilização, representou o rendimento do material. Em contraste, o comportamento do GFRP-100 apresentou um aumento constante na carga até a ruptura repentina. Esse comportamento linear entre tensão e deformação foi observado em barras de reforço individuais por Sadraie, Khaloo e Soltani (Sadraie; Khaloo; Soltani, 2019) e mostrado neste estudo para também se aplicar a lajes reforçadas.



a) ELS



b) ELU

Figura 8. Curvas de deflexão de lajes com armadura de aço e GFRP-100, a) Estágio limite de serviço; b) Estágio limite último.

A curva ELS da Figura 8 também mostra quedas de carga de menos de 1 kN para a laje de aço que se tornaram mais intensas no 1/3 final da curva. Em comparação, o GFRP-100 apresentou quedas mais relevantes no 1/3 inicial e no 1/3 final da curva. Isso indicou que a laje de aço tinha melhor controle sobre a fissuração e tinha mais fissuras com pequenas aberturas, o que explicava as quedas mais suaves na carga. No último 1/3 da curva, a armadura de aço estava no limite de fluência, o

que amplificou as quedas na carga, pois o tempo de resposta do material já estava comprometido pelo alongamento. As diferenças visuais na fissuração na face tensionada da laje reforçada com aço e GFRP-100 são mostradas na Figura 9.

Aço GFRP-100

Figura 9. Face rachada da laje reforçada com aço e GFRP-100

No geral, pode-se afirmar que a magnitude da redução na carga devido a fissuras e o número de picos na curva de carga estavam relacionados ao módulo de elasticidade do reforço, enquanto Mmax estava relacionado ao limite de tensão de fluência do reforço. Como as barras de GFRP tinham maior resistência, o GFRP-100 foi capaz de atingir M_{max} maior do que a laje de aço, mesmo se as barras de reforço fossem rompidas por cisalhamento.

3.3 Análise comparativa experimental e analítica

A Tabela 4 apresenta o momento fletor máximo de flexão (M_{max}) obtido a partir de dados experimentais e o momento nominal (M_n) calculado a partir da Eq. 3 e Eq. 4 da norma. ACI 440.1R-15 (ACI 440.1R-15, 2015).

Tabele 4. Comparação de momentos experimentais e analíticos para lajes reforçadas com GFRP.

Momentos	**Espessuras das lajes**		
	70 mm	**100 mm**	**120 mm**
M_{max} (kN.m)	5.7	42	44.8
M_n (kN.m)	5.99	10.94	13.86
$\frac{M_{max}}{M_n}$	0.95	3.84	3.23

A análise comparativa da Tabela 4 mostra que os momentos de flexão experimentais para lajes mais espessas foram maiores do que os valores analíticos. Em contraste, para a laje mais fina de 70 mm, o momento analítico foi maior do que o valor experimental. Em termos da razão M_{max}/M_n, pode-se afirmar que as lajes mais espessas de 100 mm e 120 mm tiveram uma margem de segurança

maior do que a laje de 70 mm.
A Figura 10 mostra uma comparação gráfica dos momentos de flexão experimentais e analíticos. O momento analítico teve um comportamento proporcional entre M_{max} e a espessura da laje, indicando que a espessura da laje teve pouco efeito nos ganhos de resistência. Por outro lado, os momentos experimentais mostraram ganhos claros de resistência à medida que a espessura da laje aumentou. Deve-se notar que todas as lajes tiveram a mesma razão de reforço, independentemente da espessura.

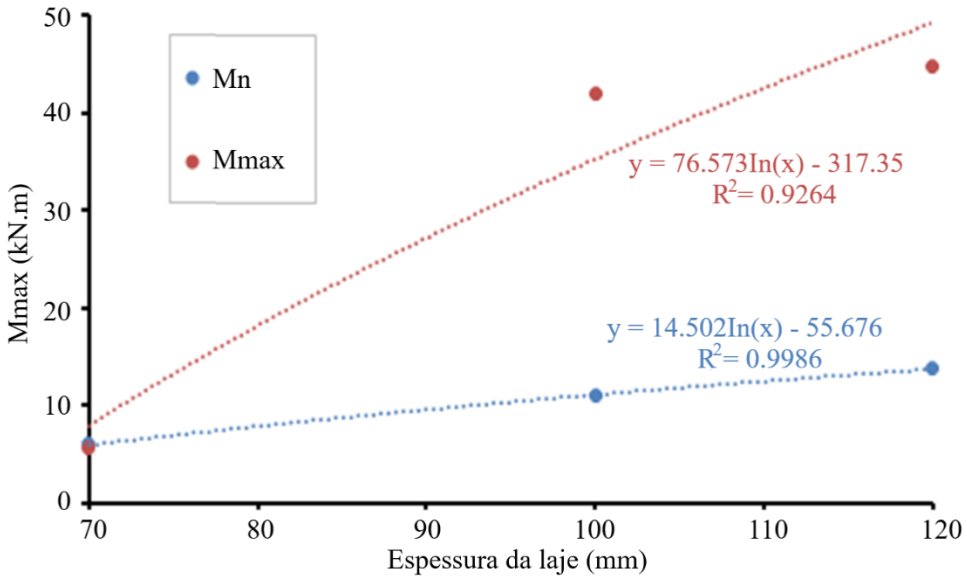


Figura 10. Momentos de flexão experimentais e analíticos em relação à espessura da laje.

A análise comparativa demonstrou uma margem de segurança elevada. No entanto, a carga máxima aplicada que resultou no momento máximo de flexão não deve ser considerada um momento efetivo em condições normais de operação, pois não incluiu efeitos de fluência e carregamento de longo prazo. Isso se deve às condições de uso da estrutura, pois se a deformação ultrapassar o limite, a estrutura é considerada inoperante. Por outro lado, os momentos nominais calculados foram menores, pois incluíram efeitos de fluência e outros fatores em suas expressões analíticas. As normas ACI 318, EN1992-1-1, ABNT NBR 6118 e outras definiram um limite superior para deformações específicas de vergalhões a fim de evitar deflexão excessiva de elementos estruturais. Além disso, Fakoor e Nematzadeh (Fakoor; Nematzadeh, 2021) declararam que acima de 8% de deformação específica, o elemento estrutural não é mais plano e, consequentemente, não é mais compatível com a lei de Hooke.
Outra análise poderia ser feita considerando que, para a laje de 70 mm, a taxa de armadura calculada é menor que a taxa de armadura balanceada. Consequentemente, a laje mais fina rompeu devido ao esmagamento do concreto, enquanto as lajes mais grossas romperam devido às tensões da barra de reforço. Assim, para lajes mais grossas, a diminuição da capacidade de carga deve ser responsável pela fluência do material da barra de reforço. Como as barras de reforço GFRP tinham um módulo de elasticidade relativamente baixo, a deformação devido a cargas de longo prazo foi menor (Gonilha; Correia; Branco, 2013; Miàs et al., 2013).
Os efeitos de carregamento de curto e longo prazo em vigas com reforço GFRP foram avaliados por Miàs et al. (Miàs et al., 2015). Os resultados mostraram que as fissuras induzidas por flexão tiveram aberturas 25% maiores para vigas submetidas a cargas de longo prazo.

4. CONCLUSÃO

As conclusões obtidas neste estudo são:
- O aumento da espessura das lajes reforçadas com GFRP resultou em um aumento linear efetivo na capacidade de carga e uma diminuição na deflexão, devido à maior rigidez do elemento;
- As curvas de deflexão das lajes de GFRP, especialmente aquelas relacionadas ao USS, refletiram o mesmo comportamento linear dos experimentos conduzidos apenas com barras de reforço;
- A comparação entre os tipos de reforço determinou que as lajes reforçadas com GFRP apresentaram maior deflexão do que as lajes reforçadas com aço. Isso foi atribuído ao GFRP ter um módulo de elasticidade aproximadamente 4 vezes menor que o aço;
- A carga da primeira fissura evidenciada na laje reforçada com aço e na laje reforçada com GFRP, ambas com a mesma espessura e número de barras, foi de 10,2 kN e 6,5 kN, respectivamente. No entanto, se a espessura da laje for aumentada em 2 cm, a primeira carga de fissura é aumentada, atingindo um valor de 12,6 kN;
- Os resultados experimentais foram comparados com cálculos analíticos de padrões internacionais. Como a análise experimental não incluiu todos os coeficientes nas expressões matemáticas, esperava-se que os resultados experimentais fossem superiores aos cálculos analíticos, e isso foi corretamente comprovado nos resultados deste estudo. Mostrando que o padrão técnico usado para calcular estruturas reforçadas de GFRP é muito conservador, e os coeficientes de mitigação podem ser revisados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração na realização dos testes e na compra de matéria-prima, especialmente por itt Performance - UNISINOS

6. REFERÊNCIAS

American Concrete Institute (2015), *ACI 440.1R-15 - Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars.* Farmington Hills: Reported by ACI Committee 440.

ASTM International (2020), *ASTM C143/20 - Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. West Conshohocken, PA.

Ahmed, A., Guo, S., Zhang, Z., Shi, C., Zhu, D. (2020), *A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete.* Construction and Building Materials, v. 256, p. 119484. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119484

Arczewska, P.; Polak, M. A.; Penlidis, A. (2021), *Degradation of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars in concrete environment.* Construction and Building Materials, v. 293, p. 123451. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123451

Ashour, A. F. (2006), *Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars.* Construction and Building Materials, v. 20, n. 10, p. 1005–1015. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.023

Bondaletova, L. I., Bondaletov, V. G. (2013), Polymer Composite Materials, p. 11-13 (in Russian).

Bakouregui, A. S., Mohamed, H. M., Yahia, A., Benmokrane, B. (2021), *Explainable extreme gradient boosting tree-based prediction of load-carrying capacity of FRP-RC columns.* Engineering Structures, v. 245, n. January, p. 112836. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112836

BARRIS, C., Torres, L., Comas, J., Miàs, C. (2013), Cracking and deflections in GFRP RC beams: An experimental study. Composites Part B: Engineering, v. 55, p. 580–590. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.07.019

Chu, K.; Hossain, K. M. A.; Lachemi, M. (2020), *Fatigue behavior of GFRP-reinforced ECC link slabs under variable stress levels and number of cycles.* Engineering Structures, v. 222, n. December 2019. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111130

Ebead, U.; Marzouk, H. (2004), *Fiber-reinforced polymer strengthening of two-way slabs.* ACI Structural Journal, v. 101, n. 5, p. 650–659. https://doi.org/10.14359/13387

Erfan, A. M., Abd Elnaby, R. M., Aziz Badr, A., El-sayed, T. A. (2021), *Flexural behavior of HSC one way slabs reinforced with basalt FRP bars.* Case Studies in Construction Materials, v. 14, p. 1–17. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00513

Fakoor, M.; Nematzadeh, M. (2021), *A new post-peak behavior assessment approach for effect of steel fibers on bond stress-slip relationship of concrete and steel bar after exposure to high temperatures.* Construction and Building Materials, v. 278, p. 122340. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122340

Gajdošová, K., Sonnenschein, R., Blaho, S., Kinčeková, S., Pecka, J. (2020), *Durability of FRP Reinforcements and Long-Term Properties.* Slovak Journal of Civil Engineering, v. 28, n. 2, p. 50–55. https://doi.org/10.2478/sjce-2020-0015

Gao, D., Fang, D., You, P., Chen, G., Tang, J. (2020), *Flexural behavior of reinforced concrete one-way slabs strengthened via external post-tensioned FRP tendons*. Engineering Structures, v. 216, p. 110718. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110718

Gonilha, J. A.; Correia, J. R.; Branco, F. A. (2013), *Creep response of GFRP-concrete hybrid structures: Application to a footbridge prototype.* Composites Part B: Engineering, v. 53, p. 193–206. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.054

Gravina, R. J., Li, J., Smith, S. T., Visintin, P. (2020), *Environmental Durability of FRP Bar-to-Concrete Bond: Critical Review.* Journal of Composites for Construction, v. 24, n. 4, p. 03120001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001016

Jabbar, S. A. A.; Farid, S. B. H. (2018), *Replacement of steel rebars by GFRP rebars in the concrete structures.* Karbala International Journal of Modern Science, v. 4, n. 2, p. 216–227. https://doi.org/10.1016/j.kijoms.2018.02.002

Kaszubska, M.; Kotynia, R.; Barros, J. A. O. (2017), *Influence of Longitudinal GFRP Reinforcement Ratio on Shear Capacity of Concrete Beams without Stirrups.* Procedia Engineering, v. 193, p. 361–368. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.225

Mahroug, M. E. M.; Ashour, A. F.; Lam, D. (2014), *Experimental response and code modelling of continuous concrete slabs reinforced with BFRP bars*. Composite Structures, v. 107, p. 664–674. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.08.029

Manalo, A., Maranan, G., Benmokrane, B., Cousin, P., Alajarmeh, O., Ferdous, W., Liang, R., Hota, G., (2020), *Comparative durability of GFRP composite reinforcing bars in concrete and in simulated concrete environments*, Cement and Concrete Composites, Volume 109, 103564, ISSN 0958-9465, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103564

Miàs, C., Torres, L., Turon, A., Sharaky, I. A. (2013), *Effect of material properties on long-term deflections of GFRP reinforced concrete beams.* Construction and Building Materials, v. 41, p. 99–108. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.055

Miàs, C., Torres, L., Turon, A. (2015), *Short and long-term cracking behaviour of GFRP reinforced concrete beams.* Composites Part B: Engineering, v. 77, p. 223–231, 2015. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.024

Najafabadi, E. P., Bazli, M., Ashrafi, H., Oskouei, A. V. (2018), *Effect of applied stress and bar characteristics on the short-term creep behavior of FRP bars*, Construction and Building Materials, Volume 171, Pages 960-968, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.204

Noël, M.; Soudki, K. (2014), *Estimation of the crack width and deformation of FRP-reinforced concrete flexural members with and without transverse shear reinforcement.* Engineering Structures, v. 59, p. 393–398. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.11.005

Peled, A., Bentur, A., Yankelevsky, D. Z. (1998), The nature of bonding between monofilament polyethylene yarns and cement matrices. Cement and Concrete Composites, v. 20, n. 4, p. 319–327. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00007-9

Rosa, I. C., Santos, P., Firmo, J. P., Correia, J. R. (2020), *Fire behaviour of concrete slab strips reinforced with sand-coated GFRP bars.* Composite Structures, v. 244, n. December 2019, p. 112270. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112270

Sadraie, H.; Khaloo, A.; Soltani, H. (2019), *Dynamic performance of concrete slabs reinforced with steel and GFRP bars under impact loading.* Engineering Structures, v. 191, n. December 2018, p. 62–81. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.038

Satasivam, S., Bai, Y., Yang, Y., Zhu, L., Zhao, X.-L. (2018), *Mechanical performance of two-way modular FRP sandwich slabs.* Composite Structures, v. 184, n. September 2017, p. 904–916, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.026

Shi, J., Wang, X., Wu, Z., Zhu, Z. (2015), Creep behavior enhancement of a basalt fiber-reinforced polymer tendon. Construction and Building Materials, v. 94, p. 750–757, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.118

Shi, X., Park, P., Rew, Y., Huang, K., Sim, C. (2020), C*onstitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension*, Construction and Building Materials, Volume 233, 117316, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117316

Starkova, O., Buschhorn, S. T., Mannov, E., Schulte, K., Aniskevich, A. (2012), *Creep and recovery of epoxy/MWCNT nanocomposites*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 43, Issue 8, Pages 1212-1218, ISSN 1359-835X, https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.03.015.

Wang, X., Shi, J., Liu, J., Yang, L., Wu, Z. (2014), *Creep behavior of basalt fiber reinforced polymer tendons for prestressing application.* Materials and Design, v. 59, p. 558–564, https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.009

Zhang, P., Hu, R., Zou, X., Liu, Y., Li, Q., Wu, G., Sheikh, S. A. (2021), *Experimental study of a novel continuous FRP-UHPC hybrid beam*, Composite Structures, Volume 261, 113329, ISSN 0263-8223, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113329.

Zheng, Y., Yu, G., Pan, Y. (2012), *Investigation of ultimate strengths of concrete bridge deck slabs reinforced with GFRP bars.* Construction and Building Materials, v. 28, n. 1, p. 482–492. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.002